

三维平顶光束激光冲击 2024 铝合金的残余应力场数值模拟

朱 然¹, 张永康², 孙桂芳^{1*}, 李 普¹, 张胜标¹, 倪中华¹

¹东南大学机械工程学院, 江苏 南京 211189;

²广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

摘要 采用有限元方法对三维平顶光束激光冲击 2024 铝合金进行数值模拟, 模拟结果与文献中的实验结果吻合。研究了不同工艺参数对材料残余应力场分布的影响。结果表明, 随着光斑尺寸的增大, 材料的残余应力增大, 而表面残余应力的变化梯度减小; 随着冲击次数的增加, 残余应力增大并趋于饱和; 当搭接率为 10% 时, 表面残余应力的变化梯度较小; 随着搭接率的增加, 深度方向残余应力增加但增幅较小。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 有限元模拟; 三维平顶光束; 残余应力

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0802007

Numerical Simulation of Residual Stress Fields in Three-Dimensional Flattened Laser Shocking of 2024 Aluminum Alloy

Zhu Ran¹, Zhang Yongkang², Sun Guifang¹, Li Pu¹, Zhang Shengbiao¹, Ni Zhonghua¹

¹School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

²School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract The numerical simulation of three-dimensional flattened laser shocking of 2024 aluminum alloy is conducted with the finite element method, and the simulation results are consistent with the experimental results obtained from literatures. The influences of different process parameters on the residual stress distribution of materials are studied. The results show that, when the spot size increases, the residual stress of materials increases while the change gradient of the surface residual stress decreases. When the shocking times increase, the residual stress increases and tends to saturate. When the overlapping rate is 10%, the change gradient of the surface residual stress is relatively small. When the overlapping rate increases, the residual stress along the depth direction increases but its increasing amplitude is small.

Key words laser technique; laser shock processing; finite element simulation; three-dimensional flattened beam; residual stress

OCIS codes 140.3390; 140.3300; 140.3430

1 引言

激光冲击强化是一种新型的表面强化技术, 其基本原理是采用高功率密度、短脉冲的激光辐照金属表

收稿日期: 2017-02-24; 收到修改稿日期: 2017-04-13

基金项目: 国家博士后基金(2015M570395, 2016T90400)、装备预研教育部联合基金(6141A02033103)、江苏省产学研前瞻性研究项目(BY2015070-05)、江苏省博士后基金(1501028A)、江苏省六大人才高峰高层次人才项目(2016-HKHT-001)、面向海洋工程的非传统水下光纤激光切割新技术与装备研究(BE2013119)

作者简介: 朱 然(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光喷丸强化和校形方面的研究。E-mail: zhulusheng2011@126.com

导师简介: 张永康(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光喷丸强化、成形和校形等方面的研究。

E-mail: zykseu@163.com

* 通信联系人。E-mail: gfsun@seu.edu.cn

面,涂覆于金属表面的保护层吸收激光能量,产生高温、高压的等离子体,该等离子体受到约束层的约束,形成高压冲击波并向材料内部传播;高压冲击波的力学效应使材料表层产生塑性变形,产生具有一定深度的残余压应力,从而显著增强金属材料的抗疲劳、防应力腐蚀和耐磨损等性能^[1-4]。目前,对激光冲击强化的数值模拟研究多采用能量呈高斯分布的光斑^[5-8],高斯分布的特性导致材料冲击区域残余应力场的分布不均匀,对激光冲击效果造成不良的影响。因此,须将高斯光束转化为能量近似均匀分布的平顶光束以消除不良影响。

平顶激光束可以将激光强度很好地分散在整个激光光斑中,且具有近场分布均匀、远场能量集中的特点。可由带梯度相位镜的光腔产生平顶激光束,或对高斯光束进行空间整形等方法获得平顶激光束^[9]。目前,关于利用平顶光束进行激光冲击强化方面的研究鲜有报道,余天宇等^[10]将平顶光束的场分布简化为一维情形下的场分布,分析了冲击波压力对材料表面和深度方向残余应力的影响。Cao等^[11]用平顶光束进行了冲击强化方面的实验和数值模拟研究,但该研究未考虑光束平顶分布特性对激光冲击强化的影响。本文建立了一种三维平顶光束激光冲击波加载的理论模型,通过文献中的实验数据对三维有限元模型进行了验证,采用有限元方法(FEM)分析了光斑尺寸、冲击次数和搭接率对残余应力场的影响。

2 三维有限元模型

2.1 理论模型

Fabbro等^[12]通过实验和理论分析,建立了等离子体轴向膨胀半经验模型,给出了冲击波峰值压力计算公式:

$$P = 0.1 \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{1/2} Z^{1/2} I^{1/2}, \quad (1)$$

式中 P 为激光冲击波产生的峰值压力,单位为 kbar(1 bar=105 Pa); α 为内能转化为热能的系数,通常取 0.1; I 为脉冲激光的平均功率密度; Z 为约束层和靶材的折合声阻抗,计算公式为

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_w} + \frac{1}{Z_t}, \quad (2)$$

式中 Z_w 和 Z_t 分别为水约束层和靶材的声阻抗。对于 2024 铝合金靶材,取 $Z_t = 1.5 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $Z_w = 0.165 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[13]。把 Z_t 、 Z_w 代入(1)式和(2)式中,得到

$$P = 0.97 \times I^{1/2}, \quad (3)$$

式中 P 的单位为 GPa。根据冲击波压力随时间变化的研究结果^[14-15],发现冲击波压力随时间的变化呈高斯分布,此次数值模拟中采用的冲击波压力加载曲线如图 1 所示。

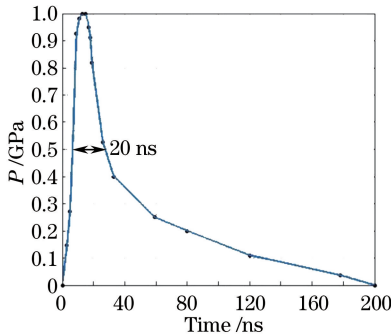


图 1 冲击波压力加载曲线

Fig. 1 Pressure loading curve of shock wave

由于超高斯函数的形式简单,因此通常用它来描述入射面上三维平顶光束 $z=0$ 处场 $E(x, y, 0)$ 的空间分布情况,函数表达式为^[16]

$$E(x, y, 0) = E_0 \cdot \exp[-2(\sqrt{x^2 + y^2}/\omega_0)^N], \quad N = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

式中 E_0 为光斑中心处平顶光束的光场强度的大小, ω_0 和 N 分别为超高斯光束光斑的尺寸大小和阶数。当 $N=2$ 时,超高斯函数变化为高斯函数,而模拟计算时取 $N=10$ 。激光脉宽通常为常量,激光功率密度函数

与场强的平方成正比,则平顶光束激光冲击波压力空间分布如图 2 所示,其三维模型表达式为

$$P = P_m \times P(t) \times P(x, y), \quad (5)$$

$$P(x, y) = \exp[-2(\sqrt{x^2 + y^2}/\omega_0)^{10}], \quad (6)$$

式中 P_m 为激光冲击波产生的峰值压力, $P(t)$ 为时间函数, $P(x, y)$ 为超高斯分布系数, t 为激光加载时间, (x, y) 为模型中加载点的坐标值。基于以上理论,在数值模拟过程中,使用 Fortran 语言描述三维平顶光束诱导冲击波压力分布模型,并实现激光冲击波的加载。

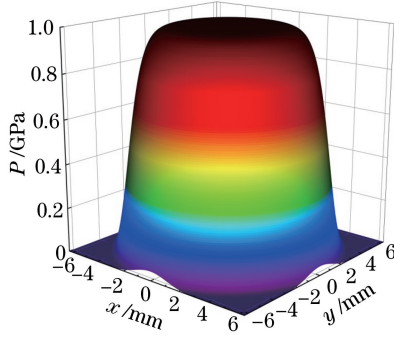


图 2 冲击波压力空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of shock wave pressure

2.2 本构模型的选择及材料性能

材料本构关系,即应力张量与应变张量的关系,是指材料在受力作用时反应出来的应力-应变关系。激光冲击过程中,材料应变率高达 10^6 s^{-1} ,因此,材料的本构模型需要定义为适合于动态冲击波载荷的本构模型。数值模拟选用 Johnson-Cook 模型,其表达式为

$$\sigma = (A + B\epsilon_p^n) \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right], \quad (7)$$

式中 A 为屈服强度, B 为硬化模量, n 为硬化系数, C 为应变强化系数, ϵ_p 为等效塑性应变, $\dot{\epsilon}$ 为动态应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为静态应变速率。数值模拟中选用 2024 铝合金,其材料性能参数见表 1^[17]。

表 1 2024 铝合金的基本材料参数

Table 1 Basic material parameters of 2024 aluminum alloy

Parameter	A /MPa	B /MPa	n	C	$\dot{\epsilon}_0$ / s^{-1}	Young modulus /GPa	Poisson ratio	Density /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Value	369	684	0.73	0.0083	1	73	0.33	2770

2.3 模型几何尺寸及网格划分

激光冲击 2024 铝合金的有限元模型如图 3 所示,为研究激光冲击在金属靶材表面及深度方向上的残余应力分布,同时考虑到三维平顶激光束的空间分布,实验采用三维模型,2024 铝合金靶材的尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。在加载区域采用有限单元 C3D8R 来分析弹塑性变形,网格划分尺寸为 $0.15 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$;边界区域采用 CIN3D8 无限单元作为非反射边界条件,减少了计算时间。

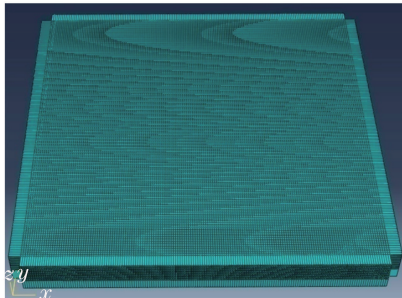


图 3 激光冲击铝合金 2024 有限元模型

Fig. 3 Finite element model of laser shocking of 2024 aluminum alloy

3 结果与分析

3.1 三维有限元模型的验证

为了验证建立的三维有限元模型,选取文献[10]中的实验数据与此次数值模拟结果进行对比分析。实验中激光脉宽为 10 ns,光斑尺寸为 6 mm,激光功率密度为 $3 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$,表面残余应力分布如图 4 所示。

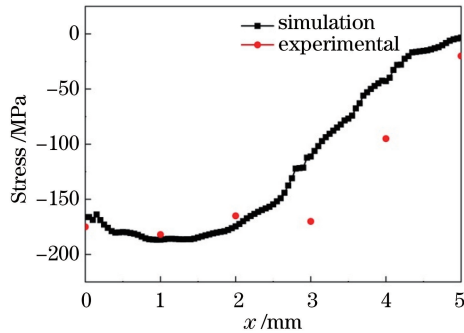


图 4 表面残余应力的模拟与实验结果

Fig. 4 Simulated and experimental results of surface residual stress

从图 4 可以看出,数值模拟结果与文献[10]的实验结果吻合,这证明了建立的三维有限元模型的可行性。

3.2 光斑尺寸对残余应力分布的影响

三维平顶激光束冲击诱导产生的残余应力云图如图 5 所示,表面残余应力数据从图 5(a)所示箭头方向提取,深度方向残余应力数据分别从图 5(b)中三箭头方向提取,然后取其平均值分析。

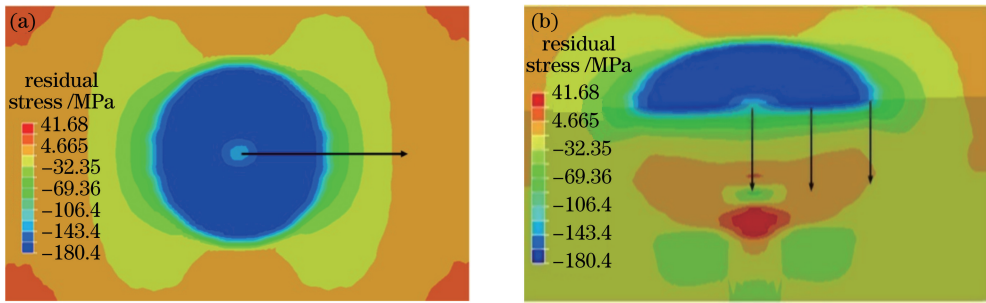


图 5 残余应力场分布。(a)表面残余应力;(b)深度方向残余应力

Fig. 5 Residual stress distributions. (a) Surface residual stress; (b) residual stress along depth direction

为研究激光光斑尺寸对残余应力场分布的影响,取光斑大小分别为 4, 5, 6, 7 mm,其他激光冲击参数保持不变,计算结果如图 6 所示。光斑尺寸对表面残余应力的影响较大,由图 6(a)可知,表面残余应力随光斑尺寸的增大而增大,表面残余应力的变化梯度随着光斑尺寸的增大而逐渐减小。由图 6(b)可知,较大的光斑尺寸有利于形成更深的残余应力层,并且残余应力也相应增加。这是因为大光斑以平面波的形式传递冲击波,而小光斑以近似球面波的形式传递冲击波,平面波传播时激光能量衰减较慢,所以塑性变形层较深。

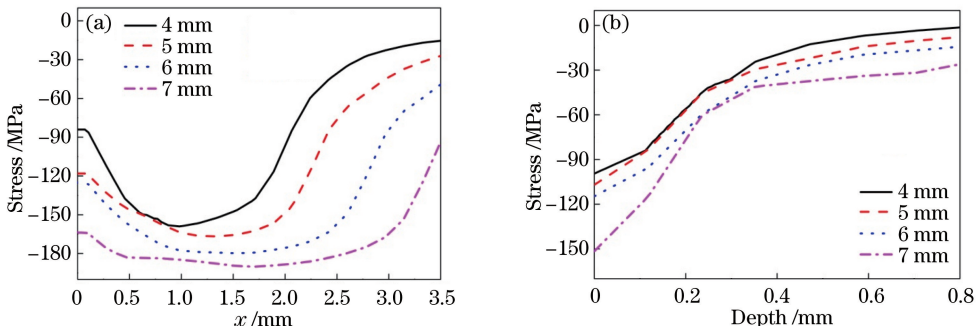


图 6 光斑尺寸对残余应力分布的影响。(a)表面方向;(b)深度方向

Fig. 6 Influence of spot size on residual stress distribution. (a) Surface direction; (b) depth direction

3.3 冲击次数对残余应力分布的影响

在激光冲击参数保持不变的情况下,对同一冲击位置分别进行 1~5 次冲击,模拟分析冲击次数对残余应力的影响规律,计算结果如图 7 所示。从图 7(a)的仿真结果可以看出,随着冲击次数的增加,表面残余应力相应增加,但是 4 次冲击后表面残余应力变化不大,4 次冲击和 5 次冲击后靶材表面残余应力分布基本相同。这是由于靶材表面产生了硬化现象,冲击次数越多硬化现象越明显。若要进一步提高残余应力水平,则要提高激光功率密度。从图 7(b)的仿真结果可以看出,随着冲击次数的增加,靶材深度方向的残余应力增大,残余应力层深度增加,但 4 次冲击后残余应力趋于饱和,经 4 次冲击和 5 次冲击后残余应力分布基本相同。

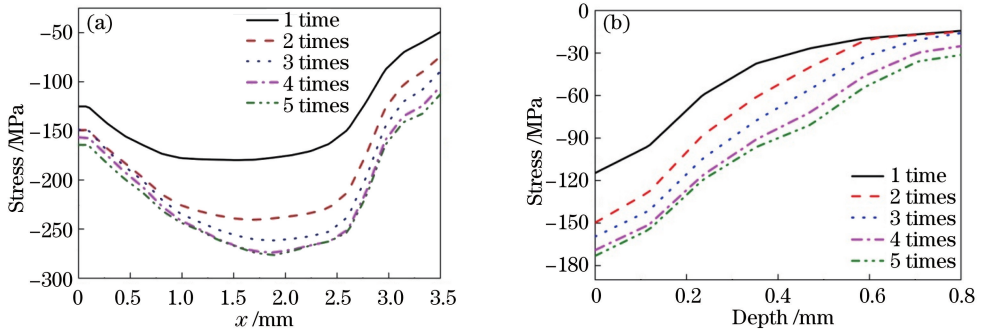


图 7 冲击次数对残余应力分布的影响。(a)表面方向;(b)深度方向

Fig. 7 Influence of impact times on residual stress distribution. (a) Surface direction; (b) depth direction

3.4 搭接率对残余应力分布的影响

激光冲击参数保持不变,分别取搭接率 φ 为 10%,30%,50%,对金属靶材进行搭接冲击模拟分析。搭接率 φ 可由公式 $\varphi = d/(2R) \times 100\%$ 计算获得,其中 d 为相邻光斑的圆心连线上光斑的重叠长度, R 为光斑半径。得到的冲击区域不同搭接率的残余应力分布如图 8 所示。从图 8(a)中可以看出,随着搭接率的增大,冲击区域表面残余应力也增大,这主要是搭接率增大使得靶材在相同区域的冲击次数增多;同时可以看出,当搭接率为 10%时,表面残余应力的变化梯度较小。从图 8(b)中可以看出,随着搭接率的增大,深度方向残余应力增大,残余应力层深度也增加,但增加幅度较小。因此,从激光冲击强化效果和经济角度考虑,优先选用 10%搭接率。

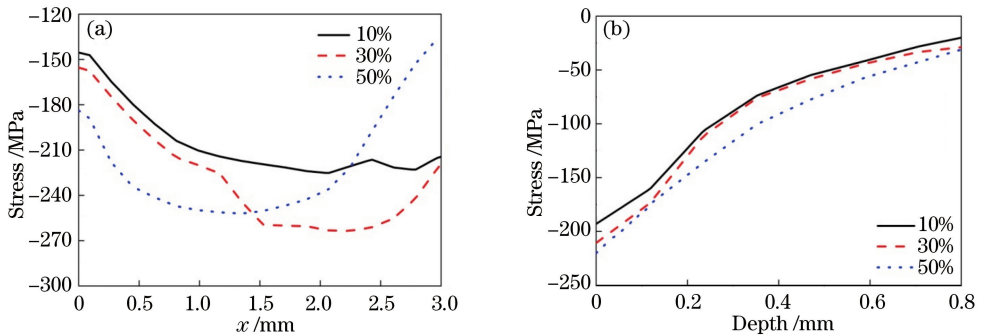


图 8 搭接率对残余应力分布的影响。(a)表面方向;(b)深度方向

Fig. 8 Influence of overlapping rate on residual stress distribution. (a) Surface direction; (b) depth direction

4 结 论

基于 Fabbro 公式和三维平顶光束的物理模型超高斯函数,建立了一种三维平顶光束激光冲击波加载的理论模型。对 2024 铝合金进行了有限元模拟,模拟结果与已有文献实验结果吻合。随着光斑尺寸的增大,表面残余应力增大,且表面应力的变化梯度减小,深度方向残余应力和残余应力层深度均增加。随着冲击次数的增加,表面和深度方向残余应力增加并逐渐达到饱和状态,当冲击次数为 4 时,残余应力基本达到饱和状态。从激光冲击强化效果和经济角度考虑,优先选用 10%搭接率。

参 考 文 献

- [1] Gujba A K, Medraj M. Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening[J]. *Materials*, 2014, 7(12): 7925-7974.
- [2] He Weifeng, Zhangjin, Yang Zhuojun, *et al.* Fatigue properties research of titanium alloy repaired by laser cladding and laser shock processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(11): 1103008.
何卫峰, 张 金, 杨卓君, 等. 激光冲击强化钛合金熔覆修复试件疲劳性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1103008.
- [3] Zhang Qinglai, Wang Rong, Zhang Bingxin, *et al.* Effect of laser shock processing on mechanical properties and microstructures of AZ31 magnesium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303001.
张青来, 王 荣, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织结构的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303001.
- [4] Lim H, Kim P, Jeong H, *et al.* Enhancement of abrasion and corrosion resistance of duplex stainless steel by laser shock peening[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(6): 1347-1354.
- [5] Luo K Y, Lu J Z, Wang Q W, *et al.* Residual stress distribution of Ti-6Al-4V alloy under different ns-LSP processing parameters[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 285: 607-615.
- [6] Wang C, Wang X G, Xu Y J, *et al.* Numerical modeling of the confined laser shock peening of the OFHC copper[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 108: 104-114.
- [7] Hu Y X, Yao Z Q. Numerical simulation and experimentation of overlapping laser shock processing with symmetry cell [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(2): 152-162.
- [8] Hfaiedh N, Peyre P, Song H B, *et al.* Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 70: 480-489.
- [9] Lü Baida. Laser optics: Beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 223-241.
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 223-241.
- [10] Yu Tianyu, Dai Fengze, Zhang Yongkang, *et al.* Simulation and experimental study on residual stress field of 2024 aluminum alloy induced by flat-top laser beam[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1003001.
余天宇, 戴峰泽, 张永康, 等. 平顶光束激光冲击 2024 铝合金诱导残余应力场的模拟与实验[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1003001.
- [11] Cao Y F, Shin Y C, Wu B X. Parametric study on single shot and overlapping laser shock peening on various metals via modeling and experiments[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132(6): 061010.
- [12] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.* Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775-784.
- [13] Berthe L, Fabbro R, Peyre P, *et al.* Shock waves from a water-confined laser-generated plasma[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(6): 2826-2832.
- [14] Correa C, de Lara L R, Díaz M, *et al.* Effect of advancing direction on fatigue life of 316L stainless steel specimens treated by double-sided laser shock peening[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 79: 1-9.
- [15] Peyre P, Chaieb I, Braham C. FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2007, 15(3): 205-221.
- [16] Perrone M R, Piegari A, Scaglione S. On the super-Gaussian unstable resonators for high-gain short-pulse laser media [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(5): 1423-1487.
- [17] Zhang Xingquan, Zhang Yongkang, Gu Yongyu, *et al.* Numerical simulation and experimental investigation on laser shock processing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(12): 181-184.
张兴权, 张永康, 顾永玉, 等. 激光冲击强化 2024-T3 铝合金的数值模拟与试验[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(12): 181-184.